

文章编号: 1001- 487X (2001) 03- 0004- 04

# 三峡三期围堰爆破拆除倾倒方案堰体翻转运动分析

燕 琳, 唐 甜, 李世海

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘 要:** 分析了爆破开出漏斗后堰体在水中的刚体运动规律, 给出了堰体翻转的必要条件, 得出了运动过程中堰体翻转角度和角速度随时间的变化曲线, 讨论了切口深度和位置及水的阻力对翻转效果的影响。结果表明, 形成足够深度的开口条件下, 堰体完全可以在重力作用下实现翻转。

**关键词:** 拆除; 爆破; 堰体; 翻转

**中图分类号:** TD 235.4<sup>+</sup>7 **文献标识码:** A

## Dynamic Simulation of Overturning Program of Demolishing the Third Stage Cofferdam in Three Gorge Project

YAN Lin, TAN G Tian, LI Shi-hai

(Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080)

**Abstract:** In terms of the overturning program of demolishing the third stage roller compacted concrete cofferdam in three Gorge, the dynamic pattern of cofferdam is analysed after blasting shapes a gap. The necessary condition of overturning is given. The angle and angle velocity are given in the duration of cofferdam's overturning. The effect of length and height of gap on overturning is discussed. The results show that, only if the gap's length is enough, cofferdam can overturn under gravity. The effect of water resistance on overturning is also considered. It is illustrated that water resistance has little effect on overturning in real cofferdam.

**Key words:** demolition; blasting; cofferdam; overturning

## 1 前言

爆破后堰体的翻转是三峡三期围堰爆破拆除倾倒方案的技术关键<sup>[1-2]</sup>。本文利用数值模拟方法对堰体的翻转运动形态进行了研究分析, 目的是为爆破开口设计提供依据。实验结果表明, 碾压混凝土(RCC)材料在爆破荷载下整体性较好, 只要爆破漏斗开口深度合理, 完全可以实现一次爆破倾倒<sup>[3-4]</sup>。

## 2 力学模型、基本假设和基本方程

三峡三期围堰典型横截面如图 1 所示, 垂直边为上游。为实现围堰的倾倒, 需在垂直边底部形成三

角形的爆破开口, 典型开口断面见图 2, 为保证破碎块体不滞留在开口内, 开口底面倾角要求大于 45°。开口形成后, 围堰上部由于失稳而向上游一侧倾倒,

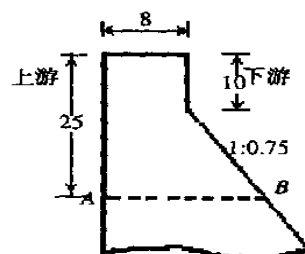


图 1 围堰断面示意图(单位:m)

收稿日期: 2001- 05- 08

作者简介: 燕 琳(1966- ), 女; 北京: 中国科学院力学研究所助理研究员

其中开口的位置和深度是决定倾倒成功的关键。用理论力学的方法模拟围堰的翻转过程作以下基本假设<sup>[5]</sup>:

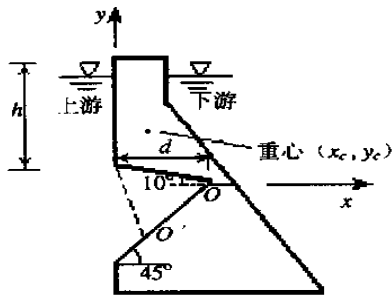


图 2 典型爆后切口示意图

- (1) 由于 RCC 材料爆破后的整体性较好, 局部的爆破开口对整个围堰没有实质性破坏, 因此可将开口后的上部围堰视为刚体。
- (2) 围堰 RCC 材料沿纵向匀质。
- (3) 在重力矩作用下, 堰体下游边残余连接部分被拉断, 堰体侧向翻转并绕  $O$  轴转动。
- (4) 堰体翻转过程中与保留堰体碰撞前后满足动量守恒。
- (5) 计算中不考虑碰撞后堰体转动以外的其它运动形式。

决定堰体翻转的主动力矩包括重力矩和水的作用力矩, 其中重力为主要主动力矩。反力矩以下游端残余连接部分的 RCC 材料强度为主。当主动力矩大于反力矩时堰体失稳。上部堰体重心与翻转支承点  $O$  之间的距离是衡量翻转的一个重要指标。按照图 2 所示的坐标体系, 堰全重心的位置坐标可按下式求出:

$$x_c = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i} \tag{1a}$$

$$y_c = \frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i} \tag{1b}$$

式中,  $m_i$  为材料的单元质量,  $x_i, y_i$  为其位置坐标。  
定义无量纲参数:  
$$\delta = (x_0 - x_c)/D \tag{2}$$
  
其中  $D$  为堰顶宽度,  $x_0$  为  $O$  点坐标, 实现翻转的必

要条件为  $\delta > 0$ 。  
在重力矩的作用下堰体绕着  $O$  轴翻转的运动用刚体定轴转动的运动方程描述为:

$$I \phi = M \tag{3}$$

其中  $I$  是堰体对于  $O$  轴的转动惯量,  $\phi$  是堰体转角,  $\phi$  是堰体角加速度,  $M$  是作用在堰体上对  $O$  轴的合力矩。

堰体绕  $O$  轴旋转一定角度后, 切口上表面与下表面相交, 发生碰撞。由于碰撞时间很短, 可以认为这一碰撞过程动量守恒, 碰撞前后堰体的角速度满足下述关系:

$$I \omega = I_0 \omega_0 \tag{4}$$

其中  $I_0$  是堰体对于  $O$  轴的转动惯量,  $\omega, \omega_0$  分别是碰撞前后堰体的角速度。

3 计算结果分析

3.1 堰体翻转的起始条件

重力是导致堰体翻转的主要外力。在考虑堰体翻转的起始条件时, 除  $\delta > 0$  外, 还要考虑堰体的重力能否提供足够的力矩以克服堰体残余连接部分的强度, 从而在上部堰体与下部堰体之间形成完全的破裂面。考虑到碾压混凝土的分层特性, 下游端的折断裂纹应为水平线, 如果不考虑爆炸载荷的作用, 可以用静力学简化计算。根据三个断面设计, 表 1 给出了相应的主动翻转力矩和残余连接部分的抗弯力矩。其中混凝土材料的基本物理参数有: 密度  $\gamma = 2.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 抗拉强度  $\sigma_t = 1.5 \text{ MPa}$ , 抗压强度  $\sigma_p = 15 \text{ MPa}$ , 弹性模量  $E = 40 \text{ GPa}$ 。主动翻转力矩  $M_g$  和抗弯力矩  $M_s$  按下式计算:

$$M_g = |x_c - x_0| W \tag{5}$$

$$M_s = 0.5 \alpha L_s^2 \tag{6}$$

其中  $W$  为翻转堰体在水中的重量, 即对水下部分的堰体取浮容重  $\gamma_w = \gamma - \gamma_w$ ,  $L_s$  为残余部分的连接长度。从表 1 可以看出, 三个拆除断面的主动翻转力矩都可以达到抗弯力矩的 2~3 倍, 说明该设计是可以拉断残余部分的连接, 并实现堰体的翻转。

表 1 三个断面的主动翻转力矩和抗弯力矩

	纵向围堰	横向围堰(已建)	横向围堰(未建)
主动翻转力矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	$9.3 \times 10^6$	$3.2 \times 10^7$	$2.5 \times 10^7$
抗弯力矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	$3.8 \times 10^6$	$1.7 \times 10^7$	$7.9 \times 10^6$

下面以三峡三期围堰横向围堰中已建部分的拆除设计断面为例, 计算堰体的翻转过程, 对影响翻转

形态的开口参数(如开口位置和深度)进行比较计算, 模型基本图象如图 2 所示, 其中  $d$  表示开口深

度,  $h$  表示开口位置。

### 3.2 堰体整体翻转的运动形态

通过计算发现, 堰体的翻转过程分两个阶段: 首先堰体绕  $O$  轴翻转, 这一阶段需约 3.2 s, 然后两个

切口相交, 发生弹性碰撞后再绕  $O$  轴继续翻转, 翻转过程的基本图象见图 3。其中反映翻转过程的参数转角和角速度如图 4 所示, 碰撞前、后堰体的角速度分别  $\omega_1 = 0.78 \text{ rad/s}$  和  $\omega_2 = 1.10 \text{ rad/s}$ 。

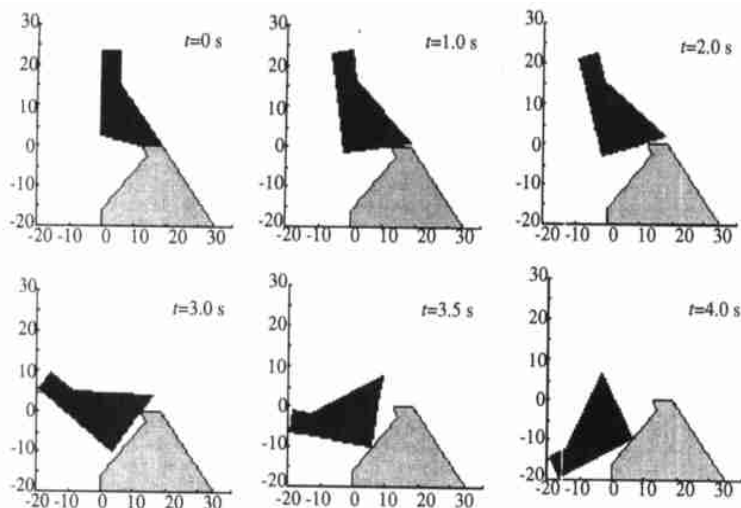


图 3 翻转过程图象

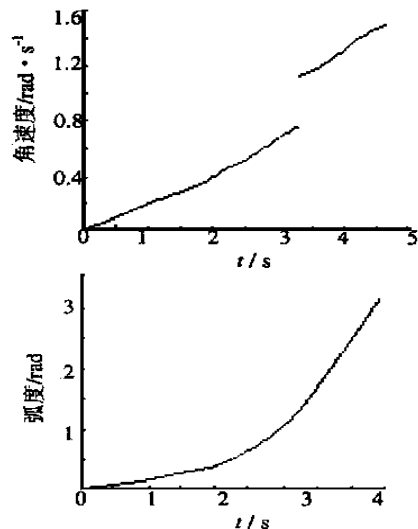


图 4 翻转过程的角度和角速度曲线

堰体翻转的起动速度和第一阶段结束时翻转堰体的角速度影响到堰体的翻转效果。实际上, 在堰体完成第一阶段的翻转后, 后续的翻转运动中将有更多的不确定因素, 如经过碰撞的堰体很可能发生破碎, 新支点  $O$  的位置将沿开口的下坡面滑动, 因此计算所得堰体第二阶段的转动在实际中很难发生。但只要保证堰体完成第一阶段的翻转, 堰体的运动就不会停止。堰体翻转的起动越快, 堰体在第一阶段的翻转就越可靠; 在第一阶段结束时的角速度越大, 对堰体的后续运动就越有利。

的角速度越大, 表明堰体的翻转越迅速。

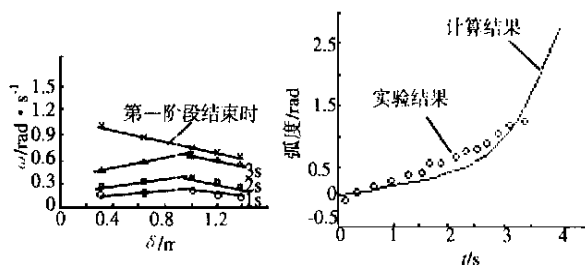


图 7  $\omega$  与  $\delta$  的关系曲线 图 8 计算与实验结果对比

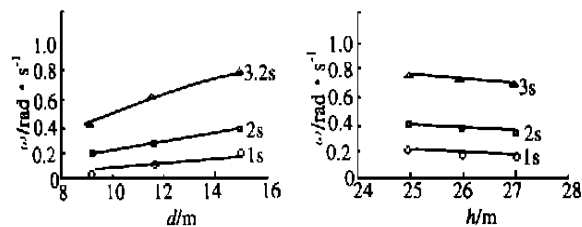


图 5  $\omega$  与  $d$  关系曲线 图 6  $\omega$  与  $h$  关系曲线

### 3.3 切口深度对翻转的影响

切口深度 ( $d$ ) 是爆破在围堰断面所形成的开口宽度。  $d$  越大越有利于堰体的翻转, 但爆破实施也就越困难。图 5 所示为切口深度分别为 14.5 m、11.7 m 和 9.2 m 时, 翻转堰体在不同时刻的角速度, 这一系列的开口深度分别对应着爆破设计中的 3 排竖孔位置。可以看出,  $d$  越大, 堰体在同一时刻所达到

### 3.4 切口位置对翻转的影响

切口位置 ( $h$ ) 是指爆破在围堰断面所形成的开口与围堰顶部的距离。分别设计计算了  $h = 25 \text{ m}$ 、 $h = 26 \text{ m}$  和  $h = 27 \text{ m}$  时堰体的翻转效果, 结果见图 6。可以看出, 对于相同大小的爆破切口, 随着切口位置的下移, 上部堰体翻转的角速度略有下降。在比较计算中以切口位置  $h = 25 \text{ m}$  较为理想。

### 3.5 角速度与 $\delta$ 的关系

如前文所述, 指标量  $\delta$  是反映堰体翻转的参数, 堰体在重力作用下翻转的必要条件是  $\delta > 0$ 。图 7 中曲线分别表示不同  $\delta$  值时堰体在不同时刻的角速度, 以及翻转第一阶段结束时的角速度。可以看出,  $\delta$  在 0~1 范围内反映堰体翻转效果的翻转起动速度随  $\delta$  的增大而增大, 当  $\delta > 1$  后反而略有下降; 相反地, 翻转第一阶段结束时的角速度随  $\delta$  的增大而缓慢减小, 角速度范围为 0.7~0.9 rad/s。一方面要求

快速的起动速度以保证堰体的翻转, 另一方面也要要求堰体在第一阶段的翻转结束时有较大的角速度以保证堰体的后续运动, 综合比较得  $\delta=1$  是较优化的选择。

## 4 实验结果的比较

根据三峡三期围堰的断面按 36:1 的比例分别模拟了有水和无水条件下围堰的翻转过程。在无水条件下, 作用力仅为重力, 只要运动相似的无量纲参数得到满足, 模型实验的结果就与模型的几何尺寸无关, 在围堰的翻转运动过程中反映运动相似的无量纲参数为  $g t^2/L$ , 据此按照目前的计算模型得到的无水条件下的计算结果与实验结果对比表示于图 8 中。可以看出, 两者有很好的一致性, 说明在无水条件下目前的计算模型是可行的。

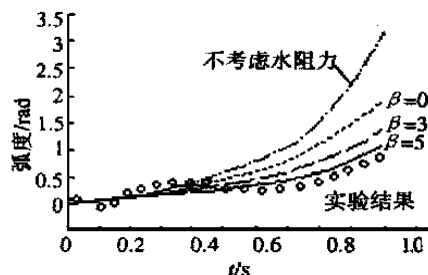


图 9 有水条件下翻转的计算结果和实验结果

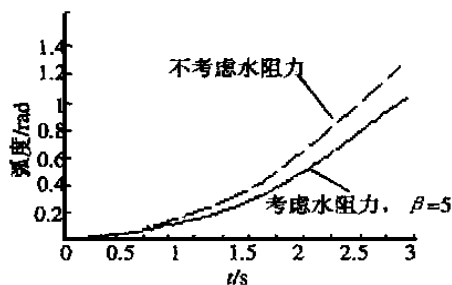


图 10 实际工程尺度下翻转的计算结果

在有水情况下还需要考虑水的粘性阻力, 由于重力相似条件下粘性力相似不能同时满足<sup>[5]</sup>, 故仅以模型参数进行对比计算。水对翻转堰体的阻力包括法向即迎面阻力  $f_1$  和切向即层流阻力  $f_2$ , 分别按下面的公式计算:

$$f_1 = \rho A v^2 \quad (7)$$

$$f_2 = 0.5 \zeta \rho (\beta v)^2 \quad (8)$$

其中  $\rho$  为水的密度,  $v$  和  $v$  分别为堰体翻转时的法向和切向速度分量,  $A$  为堰体的迎水面积,  $\zeta$  为水的阻力系数, 在 0~1 之间取值,  $\beta$  为反映水流速度与堰体翻转速度关系的系数。对比结果如图 9。可以看出,  $\beta$  越大则阻力越大, 堰体的翻转越慢, 当取  $\beta=5$

时, 计算值与实验结果吻合较好。在  $t < 0.4$  s 的范围内, 实验给出的角度值有波动, 主要原因是实验中标尺的刚度不够, 运动过程中标尺摆动。由于水的粘性阻力系数是不变的, 在实际三峡工程中, 它对堰体翻转的影响要比模型实验小, 根据模型实验的参数计算得到三峡三期堰体的翻转结果如图 10, 可以看出, 考虑水的阻力后堰体的翻转速度略有下降, 但总体影响不大。

## 5 结论

(1) 计算结果表明, 三个设计断面的主动翻转力矩均可以达到抗弯力矩的 2~3 倍, 表明爆破开口完成后堰体将在重力作用下翻转。

(2) 堰体的翻转过程经历两个阶段, 在堰体的翻转过程中, 翻转的起动速度和第一阶段结束时的角速度对翻转效果有决定性影响, 翻转起动越快, 堰体在爆后的翻转越有保障; 第一阶段结束时的角速度越大, 对堰体的后续运动越有利。

(3) 加大爆破开口的深度有利于堰体的起动翻转, 但第一阶段结束时的角速度较低, 不利于堰体的后续运动。另外加大爆破切口也增加了爆破施工的难度。

(4) 计算结果表明, 在原设计要求的基础上降低爆破切口位置并不能提高堰体在第一阶段结束时的角速度, 相反堰体的翻转起动还略有下降。

(5) 利用指标量  $\delta$  反映翻转堰体的重心与爆破开口后支点的位置关系, 综合比较得  $\delta=1$  是较优化的选择, 说明目前给出的方案是较理想的翻转倾倒方案。

(6) 与模型实验的对比结果表明, 无水条件下计算值与实验结果有很好的一致性; 有水条件下水的阻力减缓堰体的翻转速度, 在模型实验中水的阻力影响较明显, 而在实际工程中水的阻力影响较小。

## 参考文献

- 1 傅海峰 三峡工程三期碾压混凝土围堰爆破拆除方案[J] 爆破, 2000, 17(2): 43-49
- 2 李世海, 刘以钢, 郭易圆 三峡三期围堰爆破拆除方案比较[J] 爆破, 2000, 17(2): 40-42
- 3 刘以钢, 李世海 碾压混凝土围堰拆除倾倒翻转方案现场试验研究[J] 爆破器材, 2001, 30(1): 21-26
- 4 同济大学理论力学教研室 理论力学[M] 上海: 同济大学出版社, 1990
- 5 西南交通大学水力学教研室 水力学[M] 北京: 高等教育出版社, 1987